5К

УДК 004.896

Ю.Г. Кривонос, В.Г. Писаренко, Ю.Я. Панасюк, Ю.В. Писаренко, А.В. Кабась, А.А. Кобылин
Институт кибернетики им. В.М. Глушкова НАН Украины, г. Киев
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт», г. Киев
jvpisarenko@gmail.com, kabas.andrew@gmail.com, kobylin.a.a@gmail.com

Требования к бортовым средствам беспилотного летательного аппарата с элементами искусственного интеллекта для мониторинга техно-экологических происшествий

В статье сформулированы требования к бортовым средствам искусственного интеллекта (ИИ) для обеспечения выполнения беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) заданной траектории движения в условиях порывов ветра. Приведен вариант алгоритма работы бортовых систем, что обеспечивает движение внутри трубки заданного радиуса вдоль «идеальной траектории» БПЛА. Так как получение данных происходит по многим каналам, для обеспечения значительного выигрыша по времени данные предлагается обрабатывать в режиме многопроцессорных вычислителей с применением параллельного программирования в соответствии с законом «Амдала 1967».

Введение

Одно из актуальнейших направлений развития современных информационных технологий (ИТ) связано с разработкой информационной поддержки (математические модели, алгоритмы имитационного моделирования, сенсорное обеспечение, соответствующее программное обеспечение) формирования ИТ «Управление_ТЭП», развиваемой в Институте кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины [1-3]. Как было показано в наших работах, для этого требуется, в частности, разработать и создать технопарк интеллектуальных роботов (ТИР) воздушного базирования для проведения мониторинга необходимых территорий, что включает в себя следующие существенные компоненты:

– математические модели динамики воздушной среды и управляемого движения носителя сенсоров, в частности БПЛА;

– технические и программно-аппаратные средства оперативного мониторинга и идентификации происходящего техно-экологического происшествия (ТЭП);

– маршрутное задание, в соответствии с которым интеллектуальный робот должен выполнить комплексные функции (быстрая разведка, выявление очагов развивающегося ТЭП);

– некоторые элементы нейтрализации ТЭП с учетом, как правило, быстро растущих пространственных и энергетических масштабов данного ТЭП.

Широкий класс подобных задач требует использования БПЛА, способных в автономном режиме формировать из потока бортовой мультисенсорной информации основные характеристики внешней среды и с учетом обучающей выборки прогнозировать основной набор описательных характеристик развивающегося ТЭП. Это производится с

целью последующей нейтрализации в доступных пределах указанного опасного явления как собственными силами, так и чаще всего с привлечением иных средств. Требования к таким БПЛА можно свести к двум группам:

1) требования к бортовым средствам ИИ для обеспечения выполнения БПЛА заданной траектории его движения в условиях воздействия случайных порывов ветра;

2) требования к бортовым средствам ИИ для выполнения посадки на качающуюся палубу судна в условиях морского волнения.

Целью данной работы является формирование требований первой группы к бортовым средствам ИИ для обеспечения выполнения БПЛА заданной траектории его движения в условиях воздействия случайных порывов ветра. Задача обеспечения требований второй группы рассмотрена в специальной статье этих же авторов данного выпуска журнала.

Автоматическое управление движением БПЛА

Автоматическое управление БПЛА обеспечивает возможность полностью автономного полета БПЛА со стабилизацией углов ориентации и в соответствии с заданными параметрами: траектория, высота и скорость. Такое управление можно изобразить с помощью структурной схемы управления БПЛА (рис. 1).

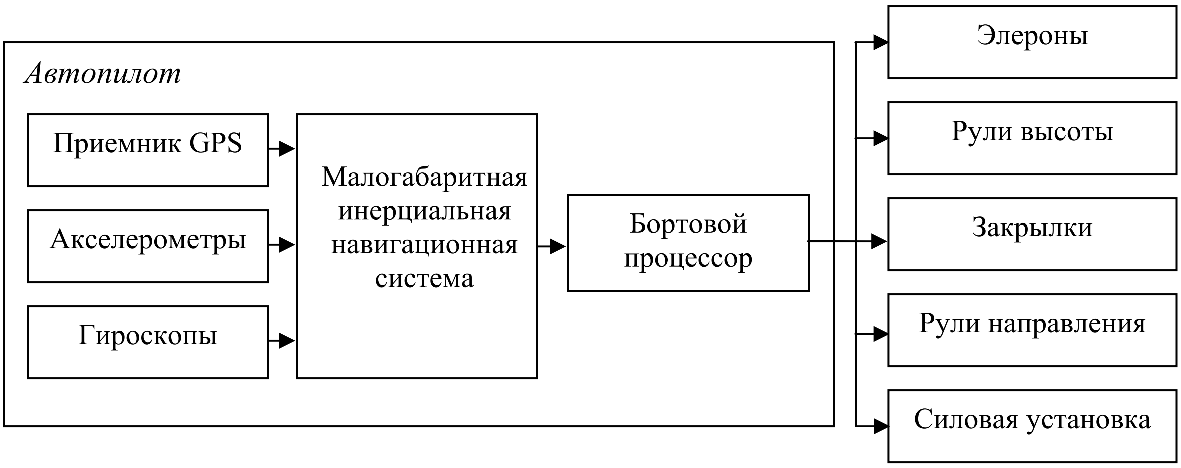


Рисунок 1 – Схема автоматического управления БПЛА

Автоматическое управление, осуществляемое полноценным автопилотом БПЛА, гарантирует безопасный полет летательного аппарата (ЛА) вне связи с базовой станцией, практически при любых внешних метеорологических условиях, даже при крайне неблагоприятных. Именно такой способ управления БПЛА в настоящее время пользуется наибольшим спросом среди пользователей беспилотных систем, поскольку предъявляет минимальные требования к подготовке обслуживающего персонала и обеспечивает безопасную и эффективную эксплуатацию систем управления БПЛА.

В работе рассмотрена актуальная задача квазиоптимального управления движением БПЛА в трубке радиуса *R*, окружающей его «идеальную траекторию полета» в условиях воздействия порывистого ветра (рис. 2 и рис. 3).

Параметры «трубки» (контрольные точки на рис. 2 по оси идеальной траектории, на осях эллипсов) задаются перед полетом оператором с учетом внешних условий: силы и направления ветра, освещенности объекта мониторинга, обусловленной временем суток и облачностью.

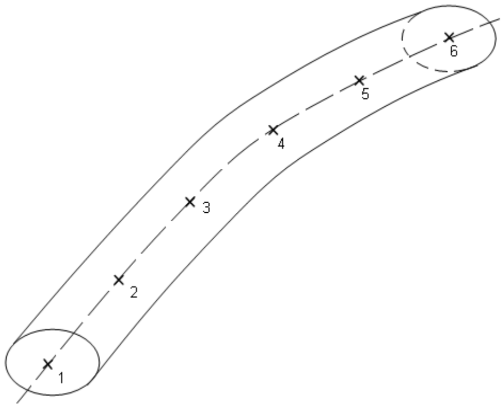


Рисунок 2 – «Трубка» радиуса *R*, окружающая «идеальную траекторию полета» БПЛА

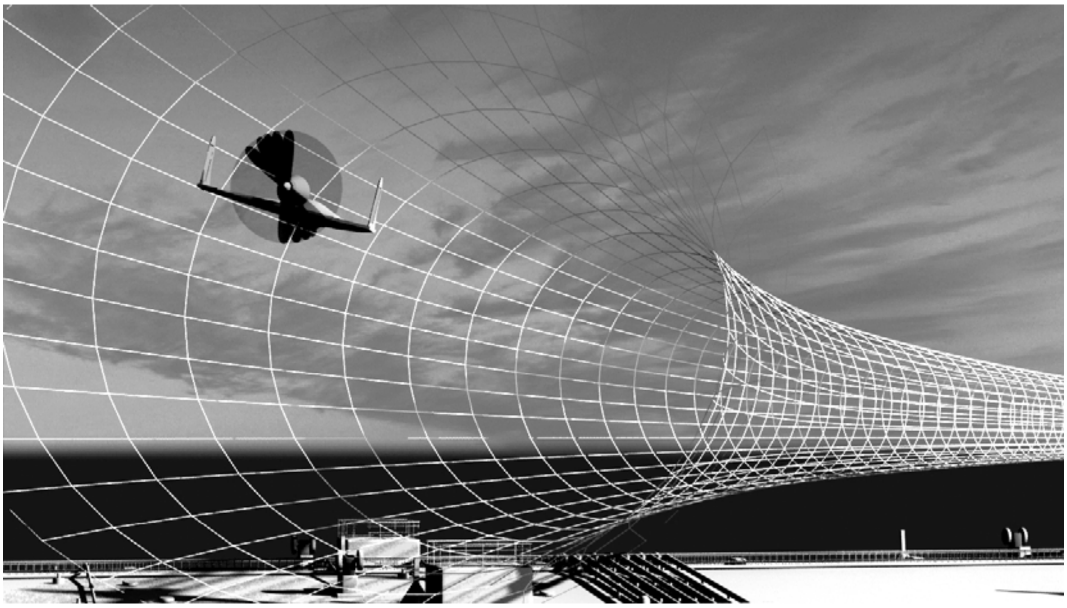


Рисунок 3 – 3D макет сцены полета БПЛА в разрешенной трубке, окружающей «идеальную траекторию полета»

Маршрутное задание предусматривает полет БПЛА (например, на заданной высоте над объектами дистанционного зондирования) в условиях воздействия ветра, переменного по скорости и направлению с требованием невыхода центра масс БПЛА за пределы «трубки» радиуса *R*.

При этом необходимо создать и реализовать бортовую систему определения текущих «непрерывно-дискретных» значений трехмерных координат, трехмерных скоростей БПЛА и трех углов ориентации БПЛА в пространстве (углы Эйлера) относительно некоторой неподвижной системы координат, связанных с землей (например, это пункт управления полетом).

Состав бортовых средств ИИ, обеспечивающих движение по программе полета

Задача обеспечения программы полета должна выполняться с помощью бортовой системы сенсоров, текущих GPS-данных в виде файла пространственных координат, файла трехмерных ускорений, файла изображений навигационных ориентиров вдоль

маршрута полета и бортового процессора с необходимым программным обеспечением. Программное обеспечение должно позволять в некоторые дискретные моменты времени вычислять с определенной точностью текущее отклонение измеренных значений этих указанных координат БПЛА (12-мерный вектор) от заданных маршрутным заданием аналогичных значений этих же значений 12-мерного вектора на «идеальной траектории» БПЛА. На борту БПЛА необходим процессор, который по текущим значениям 12-мерного вектора вычисляет необходимые на текущем такте управления полетом БПЛА последовательности команд управления, подаваемые на органы управления полетом (сила тяги маршевого двигателя, рули азимута полета, крена, тангажа, переключение режимов работы бортовых сенсоров).

В этой задаче рассмотрим подробнее вариант основных «минимально достаточных» алгоритмов работы, обеспечивающих движение БПЛА внутри трубки радиуса R вдоль «идеальной траектории полета» БПЛА (рис. 2, 3).

Таким образом, сформированы основные требования к БПЛА:

1) оценить требования к комплекту навигационных датчиков БПЛА и к комплекту бортовых сенсоров для мониторинга внешней среды с учетом маршрутного задания и изменчивости аэродинамических свойств воздушной среды;

2) учесть заложенные в процессор модельные уравнение движения БПЛА с учетом переменного воздействия вектора тяги двигателя элеронов, закрылок для БПЛА самолетного типа, несущих лопастей с переменным углом атаки БПЛА вертолетного типа;

3) учесть характеристики инерционности системы управления в звене «команда на изменение управляющих воздействий», «приведение аппарата в заданное состояние»: значения расстояния от земной поверхности по трем осям, три ориентационных угла Эйлера, трехмерные пространственные и угловые скорости;

4) сформулировать критерий необходимой точности и быстродействия выполнения команд управления в форме соответствующих функционалов качества управлении;

5) оценить совместные требования к информативности (точность измерений, частота кадров с новой информацией от данного сенсора), комплексности измерений бортовой системы принятия оптимальных решений в текущий момент времени, общее время срабатывания цепочки: «существенное изменение параметров внешней среды и координат БПЛА → идентификация нового состояния объекта мониторинга и БПЛА → приятие оптимального решения бортовым процессором (желательно на основе многосценарного моделирования в реальном времени) → выполнение адаптивных методов → изменение характеристик БПЛА в соответствии с требованиями главного задания миссии БПЛА».

Математическое описание полетного задания

В частности, для решения названных задач управления БПЛА необходимо учитывать связи пространственных координат центра масс БПЛА ($x(t)$, $y(t)$, $z(t)$) с угловыми и пространственными скоростями, выражаемые через соответствующие производные 1-го, 2-го и 3-го порядка от пространственных координат вида (1):

$$\begin{aligned}
&x(t), \quad V_x(t)=\frac{dx(t)}{dt}, \quad a_x(t)=\frac{d^2x(t)}{dt^2}, \quad \frac{da_x(t)}{dt}=\frac{d^3x(t)}{dt^3},\\
&y(t), \quad V_y(t)=\frac{dy(t)}{dt}, \quad a_y(t)=\frac{d^2y(t)}{dt^2}, \quad \frac{da_y(t)}{dt}=\frac{d^3y(t)}{dt^3},\\
&z(t), \quad V_z(t)=\frac{dz(t)}{dt}, \quad a_z(t)=\frac{d^2z(t)}{dt^2}, \quad \frac{da_z(t)}{dt}=\frac{d^3z(t)}{dt^3},
\end{aligned} \tag{1}$$

где $V_x(t)$, $V_y(t)$, $V_z(t)$ – пространственные скорости, $a(t)$ – ускорение.

Движение летательного аппарата (ЛА) описывается уравнениями (2) [4-8]:

$$m\left(\frac{dV_x}{dt} + \omega_y V_z - \omega_z V_y\right) = \sum F_x,$$

$$m\left(\frac{dV_y}{dt} + \omega_z V_x - \omega_x V_z\right) = \sum F_y, \quad (2)$$

$$m\left(\frac{dV_z}{dt} + \omega_x V_y - \omega_y V_x\right) = \sum F_z,$$

где V_x, V_y, V_z – проекции вектора скорости центра масс ЛА на оси фиксированной системы координат земной поверхности (например, связанной с командным пунктом управления); ω_x, ω_y, ω_z – проекции угловой скорости вращения подвижных осей (жестко связанных с БПЛА) на оси неподвижной системы координат на земле (командный пункт); $\sum F_x$, $\sum F_y$, $\sum F_z$ – проекции всех сил, действующих на ЛА, на оси подвижной системы координат, связанной с БПЛА.

Вращение ЛА относительно его центра масс определяется уравнением (3):

$$\frac{d\overline{K}}{dt} = \overline{M}, \quad (3)$$

где $\overline{K}$ – главный момент количества движения ЛА как твердого тела; $\overline{M}$ – главный момент всех внешних сил относительно центра масс БПЛА.

Замена пилотируемого ЛА на БПЛА очевидно возможна лишь в том случае, если бортовая навигационная автоматика на БПЛА успевает обновлять текущие данные о трех координатах центра масс БПЛА и трех углах Эйлера, описывающих ориентацию БПЛА относительно исходной неподвижной системы координат. Неподвижная система координат связана с неподвижной посадочной площадкой БПЛА.

На рис. 4. приведен вариант основного алгоритма работы бортовых систем, обеспечивающий движение внутри трубки радиуса R вдоль «идеальной траектории» БПЛА. На рис. 4 введены следующие обозначения: α_j – время ожидания GPS приемника для получения текущих GPS координат на j-м шаге (получаются усредненные данные от спутников); β_j – время на получение изображения и извлечение данных о положении текущих навигационных ориентиров на изображении местности; γ_j – время на получение данных о трех векторах угловых ускорений по данным трехосевого гироскопа; δ_j – время на запись в файл данных; ξ_j – максимальное время обработки данных: $\xi_j = \max(\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j) + \kappa_j$, $\kappa_j > 0$; κ_j – время на выполнение расчетов значений управляющих сигналов; λ_j – время выполнения необходимых режимов работы органов управления БПЛА (корректирующие сигналы для сближения с идеальной траекторией), затребованных по результатам работы предыдущего блока: $\lambda_j - \kappa_j = \mu_j$, $\mu_j > 0$; μ_j – время, затраченное на вы-полнения команд управления всеми задействованными органами управления (работа маршевого двигателя, работа рулей направления, высоты, крена, тангажа).

Варианты α, β, γ, δ, ξ, κ, λ, μ непосредственно связаны с техническими характеристиками бортовой аппаратуры БПЛА (типы сенсоров, точность измерений, тактовая частота бортовых процессоров, обрабатывающих информацию и вычисляющих необходимые команды управления). И, как следует из схемы на рис. 4, оптимальное решение требует параллельных операций (блоки 1, 2, 3 и др.).

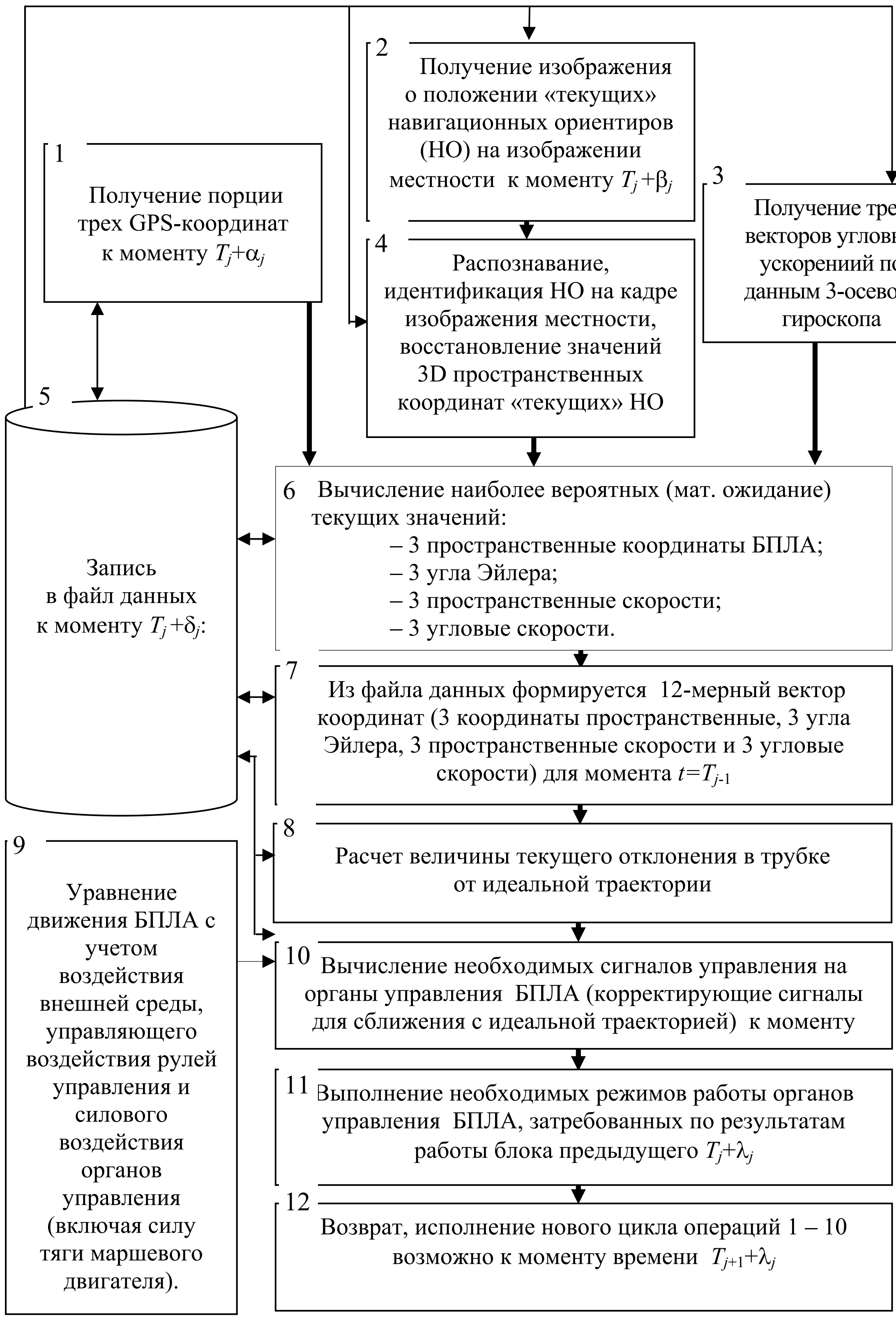


Рисунок 4 – Вариант алгоритма работы бортовых систем, обеспечивающий движение внутри трубки радиуса R вдоль «идеальной траектории» БПЛА

Эта достаточно непростая схема является исходным объектом для оптимальной схемотехнической реализации, оставляющая большой простор для конкретного выбора в зависимости от конкретных нужд заказчика, доступных на рынке комплектующих и доступных разработчикам финансовых ресурсов. Многомерный критерий оптимального выбора схемотехнического решения для задачи получения 12-мерных координат БПЛА и минимизации времени отработки команд управления для обеспечения следования вдоль окрестности идеальной кривой, заключенной в трубке (рис. 2 и рис. 3), может быть в достаточно общем случае записан следующей формулой (3):

$$F = \eta \cdot |D(t)| + \nu \cdot \left(\frac{Z^*}{Z} \right) + \sigma \cdot T \xrightarrow[\text{var } M]{} \min, \quad (3)$$

где M – множество всех доступных разработчикам схемотехнических решений $M= = \cup\, m_i$; m_i – i-е схемотехническое решение из всего множества M, доступного данному разработчику, $i = 1,\dots,N$; $D(t)$ – дисперсия вектора B(t), т.е. погрешность экспериментально вычисляемого 12-мерного вектора координат центра масс БПЛА; Z – реальные затраты на разработку, создание и испытание текущего схемотехнического решения конструкции БПЛА (как один элемент множества M) на улучшение прототипа; Z^* – стоимость готового прототипа (выбранный разработчиками известный прототип, параметры которого должны быть значительно улучшены); T – быстродействие устройства (т.е. длина такта во времени очередной процедуры от измерения до получения значений координат + время отработки команд управления бортовой навигационной системой на очередном такте во времени); η, ν, σ – весовые коэффициенты, подбираются в зависимости от важности соответствующего слагаемого для каждого технического задания; $B(t)$ – 12-мерный вектор координат БПЛА: значения координат центра масс БПЛА по трем осям, значения трех пространственных скоростей, значения трех ориентационных углов Эйлера, значения трех угловых скоростей в данный момент:

$$B(t) = \{x(t), y(t), z(t), V_x(t), V_y(t), V_z(t), \alpha(t), \beta(t), \gamma(t), \omega_x(t), \omega_y(t), \omega_z(t)\}.$$

Поскольку получение данных происходит по многим каналам, информацию желательно обрабатывать в режиме многопроцессорных вычислителей с применением параллельного программирования. Это обеспечивает значительный выигрыш по времени с учетом следующей формулы закона «Амдала 1967»:

$$\frac{T_1}{T_n} = \frac{N}{1 + \sigma(N-1)},$$

где N – число процессоров, параллельно обрабатывающих информацию; T_n – время выполнения параллельной программы; T_1 – время выполнения расчетов с помощью чисто последовательной программы; $1 \le \sigma \le 0$ – доля вычислений, которые нельзя распараллелить.

Создание тренажера для апробации отдельных технических решений по реализации ИИ для различных реализаций быстроменяющихся аэродинамических характеристик воздушного пространства и/или с учетом адаптивного управления средствами ИИ описано в отдельной статье этих же авторов данного сборника.

Выводы

Сформулированы требования к бортовым средствам ИИ для обеспечения выполнения БПЛА заданной траектории движения в условиях воздействия случайных порывов ветра.

Приведен вариант основного алгоритма работы бортовых систем, обеспечивающий движение внутри трубки заданого радиуса вдоль «идеальной траектории полета» БПЛА.

Поскольку получение данных происходит по многим каналам, для обеспечения значительного выигрыша по времени данные предлагается обрабатывать в режиме многопроцессорных вычислителей с применением параллельного программирования в соответствии с законом «Амдала 1967».

Литература

1. Писаренко В.Г. Информационные технологии управления опасными техно-экологическими происшествиями / В.Г. Писаренко, Ю.В. Писаренко – М. : Зодиак, 2007. – 112 с.
2. Писаренко В.Г. Разработка информационно-аналитических систем поддержки принятия решений по управлению опасными быстропротекающими технологическими происшествиями / В.Г. Писаренко, Ю.В. Писаренко // Міжнар. конф. 50 років Інституту кібернетики імені В.М.Глушкова. Праці конференції. (Київ. 24 – 26 грудня 2007 р.) – 2007. – С. 214-222.
3. Робототехнические системы с интеллектуальными сенсорами и многопроцессорными имитаторами динамического состояния объекта управления / В.Г. Писаренко, И.А. Варава, Ю.В. Писаренко, В.И. Семенова // Искусственный интеллект. – 2004. – № 3. – С. 752-758.
4. Лебедев А.А. Динамика полета беспилотных лет аппаратов / А.А. Лебедев, Л.С. Чернобровкин. – Москва : Машиностроение, 1973. – 616 с.
5. Чумак П.И. Расчет, проектирование и постройка сверхлегких самолетов / П.И. Чумак, В.Ф. Кривокрысенко – Москва : Патриот, 1991. – 240 с.
6. Нейрокомпьютеры в авиации / под ред. А.И. Галушкин, В.И. Васильев и др. – Москва : Радиотехника, 2004. – 296 с.
7. Аэромеханика самолета : динамика полета / под ред. А.Ф. Бочкарева, В.В. Андриевского. – Москва : Машиностроение, 1985. – 360 с.
8. Аржаников Н.С. Аэродинамика летательных аппаратов / Н.С. Аржаников, Г.С. Садекова – Москва : Высшая школа, 1983. – 359 с.

Literatura

1. Pisarenko V.G., Pisarenko J.V. Information Technology of dangerous techno-environmental incidents Management . Moscow: «Zodiak».2007. 112.
2. Pisarenko V.G., Pisarenko J.V. The development of information -analytical system decision support systems for the management of hazardous rapid technological incidents // Intern. Conf. "50 years of Glushkov Institute of Cybernetics". Proceedings of the conference. Kyiv. 24-26 December 2007. – 2007. – P. 214-222.
3. Pisarenko V.G., Varava I.A., Pisarenko J.V., Semenova V.I. Robotic systems with smart sensors and multi-processor simulator of dynamic object state management // Artificial intelligence. – 2004. – №3. – P. 752-758.
4. Lebedev A.A., Chernobrovkin L.S. Flight dynamics of unmanned aerial vehicles. Moscow: «Mashynostroenie». 1973. 616.
5. Chumak P.I., Krivokrysenko V.F. Calculation, design and construction of ultralight aircraft. – Moscow: «Patriot». – 1991. – 240.
6. Neurocomputers in aviation. Editors: A.I. Galushkin, V.I. Vasilev and others. Moscow: «Radiotehnika». 2004. 296.
7. Aircraft aeromechanics: flight dynamics. Editors: A.F.Bochkarev, V.V.Andrievsky. Moscow: «Mashynostroenie». 1985. 360.
8. Arjannikov N.S., Cadekova G.S. Aircraft aerodynamics. – Moscow: «High school». – 1983. – 359.

Yu. Krivinos, V. Pisarenko, Yu. Panasyuk, J. Pisarenko, A. Kabas, A. Kobylin

Requirements for on-board hardware of unmanned aerial vehicle with elements of artificial intelligence for the techno-ecological accidents monitoring

In this paper requirements to onboard means of artificial intelligence for performance by unmanned aerial vehicle (UAV) of the specified movement trajectory in the conditions of wind casual flaws influence are formulated. The variant of onboard systems work algorithm, providing movement in a tube given radius along an «ideal fly trajectory» of UAV is resulted. As data receive occurs via many channels, for maintenance of a considerable payoff on time is offered to process the information in a mode of multiprocessing calculators with application of parallel programming according to the Amdal's law by 1967.

Статья поступила в редакцию 21.06.2011.